

Влияние позднего образования этtringита на долговечность растворов: важность термического контроля

Комлан Вианней Зомахун^{1*} , Кокуви Агапи Хоуану¹ , Марк Содомон^{2*} , Светлана Васильевна Самченко² 

¹ Университет Абомей-Калави, Политехническая школа Абомей-Калави, Лаборатория энергетики и прикладной механики, Абомей-Калави, Республика Бенин

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Российская Федерация

* Авторы, ответственные за переписку: e-mail: vianneyzomahoun@gmail.com, sodomonmarc@yahoo.fr

АННОТАЦИЯ

Введение. Данное исследование является частью более широкого изучения явления позднего образования этtringита (DEF) в бетоне и его последствий для долговечности бетонно-растворных систем. Цель исследования заключается в анализе влияния начальных температурных условий свежего бетона на развитие явления внутренней сульфатной реакции (BCP), механические характеристики бетона и поведение раствора, нанесенного на поверхность после затвердевания. **Методы и материалы.** Были изготовлены три бетонные смеси, обозначенные как BP1, BP2 и BP3, которые подверглись испытанию DEF на кубических образцах, включая непрерывный мониторинг изменения температуры. Температура свежего бетона намеренно варьировалась с целью оценки ее влияния. Экспериментальная программа проводилась в Африке, а именно в Бенине. Мы сделали тесты на прочность при сжатии и растяжении. Убедившись, что бетон подходит, мы нанесли раствор на бетон. Затем мы следили за поведением раствора 90 дней, просто глядя на поверхность раствора. Было интересно наблюдать, как меняется поверхность раствора. **Результаты и обсуждение.** Мы видим, что у бетонов BP1 и BP2, когда стартовая температура была ниже 35 °С, тепловое поведение в тесте DEF оставалось стабильным, а максимум температуры не поднимался выше 80 °С. При таких условиях получились хорошие механические свойства и ровное покрытие раствора – треск и повреждения на поверхности не заметили. А вот бетон BP3, у которого стартовая температура была выше 35 °С, вел себя иначе: тепловой режим стал нестабильным, хотя максимум все равно оставался ниже критического порога. Нестабильность ухудшила механические свойства и ухудшила эксплуатационные характеристики материала. **Заключение.** Контроль начальных тепловых условий свежего бетона является ключевым параметром для ограничения развития DEF, сохранения механических характеристик бетона и обеспечения долговечности нанесенных растворов. В частности, начальная температура свежего бетона не должна превышать 35 °С, так как более высокие значения температуры могут способствовать развитию внутренней сульфатной реакции (BCP) внутри самого бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутренняя сульфатная реакция, позднее образование этtringита (DEF), бетон, раствор, тепловые условия, механические характеристики

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы статьи выражают благодарность компании EIFFAGE GENIE CIVIL MARINE за предоставленную лабораторию.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Зомахун К.В., Хоуану К.А., Содомон М., Самченко С.В. Влияние позднего образования этtringита на долговечность растворов: важность термического контроля. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(3):363–378. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-363-378>. – EDN: NYVMFH.

Influence of delayed ettringite formation on the durability of mortars: the importance of thermal control

Comlan V. Zomahoun^{1*} , Kocouvi A. Houanou¹ , Marc Sodomon^{2*} , Svetlana V. Samchenko² 

¹ University of Abomey-Calavi, Abomey-Calavi Polytechnic School, Laboratory of Energetics and Applied Mechanics, Abomey-Calavi, Republic of Benin

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding authors: e-mail: vianneyzomahoun@gmail.com, sodomonmarc@yahoo.fr

ABSTRACT

Introduction. This study is part of a broader investigation into the phenomenon of delayed ettringite formation (DEF) in concrete and its consequences on the durability of concrete–mortar systems. The objective of the research is to analyze the influence of the initial thermal conditions of fresh concrete on the development of internal sulfate reaction (ISR), the mechanical properties of concrete, and the behavior of mortar applied to the surface after hardening. **Materials and Methods.** Three concrete mixtures, designated BP1, BP2, and BP3, were produced and subjected to DEF testing on cubic specimens, including continuous temperature monitoring. The temperature of fresh concrete was intentionally varied in order to evaluate its influence. The experimental program was carried out in Africa, specifically in Benin. Compressive and tensile strength tests were performed. After verifying that the concrete was suitable, mortar was applied to the concrete surface. The behavior of the mortar was then monitored over a period of 90 days through visual observation of the mortar surface. It was particularly interesting to observe the evolution of the mortar surface over time. **Results and Discussion.** The results has shown that for concretes BP1 and BP2, when the initial temperature was below 35 °C, the thermal behavior during the DEF test was stable, and the maximum temperature did not exceed 80 °C. Under such conditions, appropriate mechanical properties and a uniform coating of mortar were obtained without any visible cracking or surface damage. Nevertheless, for concrete BP3 with initial temperature higher than 35 °C, the thermal behavior became unstable, but the maximum temperature remained lower than the critical one. It was observed that this instability negatively affected the mechanical properties and reduced the durability performance of the material. **Conclusion.** The control of the initial thermal conditions of fresh concrete is a key parameter for limiting the development of DEF, preserving the mechanical properties of concrete, and ensuring the durability of applied mortars. In particular, the initial temperature of fresh concrete should not exceed 35 °C, since higher temperatures may promote the development of internal sulfate reaction (ISR) within the concrete itself.

KEYWORDS: internal sulfate reaction, delayed ettringite formation (DEF), concrete, mortar, thermal conditions, mechanical properties

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors thank EIFFAGE GENIE CIVIL MARINE and EIFFAGE GENIE CIVIL for providing laboratory access and their valuable support.

FOR CITATION:

Zomahoun C.V., Houanou K. A., Sodomon M., Samchenko S.V. Influence of delayed ettringite formation on the durability of mortars: the importance of thermal control. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(3):363–378. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-363-378>. – EDN: NYMFH.

ВВЕДЕНИЕ

В африканских странах и, в частности в Бенине, климатические условия характеризуются высокими температурами, которые часто превышают 30 °C и могут подниматься еще выше в зависимости от сезона. Эти температурные условия являются важным фактором окружающей среды, влияющим на поведение строительных материалов, особенно бетона и строительного раствора.

Повышенные температуры на ранних этапах затвердевания бетона или во время укладки раствора могут изменить механические и физико-химиче-

ские свойства этих материалов. Многочисленными исследованиями показано, что повышенные температуры (более 25 °C) ускоряют реакции гидратации цемента [1–3]. Повышение температуры при твердении бетона приводит к нарушению внутренней микроструктуры и способствует развитию дефектов в бетоне, включая внутреннюю сульфатную реакцию (ВСР).

Позднее образование этрингита (DEF) – это аномалия бетона, впервые выявленная на реальных сооружениях в конце 1980-х годов. Некоторые исследователи сообщали о случаях, когда сборные элементы, подвергнутые термоотверждению, впо-

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

следствии подвергались разрушению, что приводило к снижению их механических характеристик [4].

Позднее образование этрингита (DEF) впервые было выявлено в сборных железобетонных изделиях в конце 1980-х годов [4]. Впоследствии в литературе были опубликованы многочисленные тематические исследования и экспертные отчеты, в том числе [5, 6], содержащие описания случаев одновременно протекающей щелочно-кремнеземной реакции и позднего образования этрингита [7–9]. Во Франции внутренняя сульфатная реакция была выявлена в нескольких десятках монолитных конструкций [10–13], а также в сборных железобетонных элементах [14].

Сульфатные атаки представляют собой серьезную проблему долговечности для бетонных конструкций. Эти атаки повреждают бетон, ухудшая его механические свойства. В частности, внутренняя сульфатная реакция приводит к отсроченному образованию этрингита, что вызывает расширение внутри бетона и развитие сетевых трещин [15].

Когда конструкция подвергается воздействию, крайне важно точно диагностировать развитие дефектов, оценить ее пригодность к эксплуатации, предсказать механическую эволюцию конструкции и применить соответствующие методы ремонта. Достижение этих целей требует глубокого понимания последствий DEF как на микроструктурном, так и на макроструктурном уровне. Было проведено множество экспериментальных и теоретических исследований с целью выявления вовлеченных физико-химических механизмов и параметров, влияющих на позднее образование этрингита (DEF). Тем не менее, сложность процессов, лежащих в основе явлений, затрудняет прямую экстраполяцию этих знаний для объяснения эффектов на структурном уровне. Поэтому макроскопические подходы могут дать дополнительные сведения, опираясь на знания, уже имеющиеся в литературе [2]. Развитие дефектов также затрагивает раствор, нанесенный на бетонные основания, тем самым ухудшая видимое качество поверхности, тогда как фактическая причина растрескивания и других наблюдаемых повреждений заключается в DEF, происходящем внутри самого бетона. Такие нарушения обычно появляются через несколько лет или даже десятилетий, что затрудняет как изучение данной аномалии, так и выбор подходящих стратегий ремонта, направленных на продление срока службы поврежденных конструкций [3].

Целью данной работы является оценка в реальных условиях окружающей среды риска развития позднего образования этрингита (DEF) в бетоне, а затем анализ поведения покрытий, нанесенных на этот субстрат, с целью оценки долгосрочной эволюции и состояния поверхности раствора.

С этой целью принятая методология построена на следующих основных аспектах:

- Оценка повышения температуры в соответствии с руководством IFSTTAR (октябрь 2017 г.) [16];
- Проведение испытания на образце-кубике со стороной 1 м, оснащенном теплоизолированными датчиками (полуадиабатические условия), с использованием бетонной смеси, демонстрирующей наибольший рост температуры;
- Проведение испытания на образце-кубике со стороной 1,6 м, оснащенном датчиками, не имеющими теплоизоляции, с использованием бетонной смеси, демонстрирующей наибольший рост температуры;
- Нанесение штукатурного слоя на соответствующий бетон с использованием растворов, усиленных джутовыми волокнами, с целью мониторинга состояния поверхности раствора в течение 90 дней.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оборудование для исследования

При проведении испытаний использовалось лабораторное оборудование, соответствующее действующим стандартам по анализу механических и физических свойств, а также долговечности материалов. Все использованное оборудование сертифицировано и признано в рамках стандартизированных протоколов, что гарантирует достоверность и воспроизводимость полученных результатов.

Материалы

В данной работе использовались следующие материалы:

- Песок фракции 0/4 из Кокотомей (юг Бенина).
- Щебень (фракции 0/5, 5/15 и 15/25) из Сетто г. (центр Бенина).
- Добавки от Sika Chemical Corporation (Sika ViscoFlow 800 POWER, Sika ViscoFlow 200 TIMER и SikaTard 300 SLS).
- Цемент ЦЕМ III/B 42.5N из NOCIBE Бенин (Новый цементный завод Бенина).
- Вода для замеса поставляется SONEB (Национальной корпорацией водоснабжения Бенина).
- Джутовые волокна получены из джутовых мешков с рынка Дантопка (Бенин).

Методы испытаний

Испытания бетона и раствора проводились в соответствии с действующими нормами, касающимися состава и эксплуатационных характеристик бетона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ



Рис. 1. а – прибор для испытания песчаного эквивалента; б – прибор для испытания на свободное выделение воды; с – стол для испытания текучести; d – испытание осадки (испытание конусом Абрамса); е – термопара; f – прибор для испытания метиленовым синим



Рис. 2. а – гидрометр; б – весы; с – машина для испытания на растяжение

Они в основном основаны на гармонизированных европейских стандартах (NFEN), принятых AFNOR, а также на французских стандартах серии NF P и национальных нормативных документах, таких как fascicule de documentation.

Испытания, связанные с поздним образованием этрингита (DEF), проводились в соответствии со стандартизованными и широко признанными протоколами оценки данного типа аномалии бетона. В частности, экспериментальные процедуры осуществлялись в соответствии с рекомендациями

IFSTTAR (Французского института науки и технологий транспорта, развития и сетей), направленными на предотвращение и выявление нарушений, связанных с ВСП.

Для обеспечения надежности и статистической достоверности результатов каждое испытание повторялось шесть (6) раз. Представленные результаты соответствуют среднему значению полученных измерений, что помогает минимизировать влияние экспериментальных погрешностей и повышает научную значимость выводов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ



Рис. 3. а – серия сит; б – печь; с – машина для испытания на сжатие

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения пригодности использованных материалов в данном исследовании были проведены определения свойств песка, заполнителя, цемента и джутовых волокон.

Песок

Измеренные характеристики приведены в таблице выше и сопоставлены со стандартными техническими условиями. Согласно результатам, гранулометрический состав песка соответствует требованиям.

Полученные результаты показывают, что песок фракции 0/4 из Кокотомей (Бенин) можно отнести к классу А в соответствии со статьей 10 стандарта NF P 18-545 (2021). Таким образом, он соответствует требованиям и считается пригодным для использования в бетоне.

Дробленый заполнитель

Дробленый заполнитель 15/25

Измеренные значения показывают, что фракция 15/25 может быть классифицирована по коду А в соответствии со статьей 10 стандарта NF P 18-545

(2021). Таким образом, данный материал считается пригодным для использования в бетонных смесях с гранулометрическим составом 14/22,4, соответствующим классам размера частиц: серия 1 и серия 2 (фракция 15/25 не признается в стандарте NF EN 12620 (2008)).

Дробленый заполнитель 5/15

Измеренные значения показывают, что заполнитель 0/5 может быть классифицирован по коду А в соответствии со статьей 10 стандарта NF P 18-545 (2021). Следовательно, этот материал считается пригодным для использования в рецептурах бетонных смесей с гранулометрическим составом 0/5,6, что соответствует классу зернистости: базовая серия + серия 1 (фракция размером 0/5 не признается в стандарте NF EN 12620 (2008)).

Дробленый заполнитель 0/5

Измеренные значения показывают, что заполнитель 0/5 может быть классифицирован по коду А в соответствии со статьей 10 стандарта NF P 18-545 (2021). Следовательно, этот материал считается пригодным для использования в рецептурах бетонных

Таблица 1. Результаты анализа размера частиц песка

Сито (мм)	5,6	4 (2*D)	2,8 (1,4*D)	2	1	0,50	0,250	0,125	0,063
Единица измерения – Метод	Кумулятивный пропуск (%) – NF EN 933-1 (2012)								
Обнаруженные значения	10	10	100	99	96	72	30	6	1,0
Предельные значения	макс	–	100	100	100	–	50	–	10
	мин	–	100	95	90	60	–	0	0

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Таблица 2. Результаты испытаний песка

Параметр	Метод	Единица	Среднее значение	Спецификация
Реальная плотность	NF EN 1097-6 (2022)	мг/м ³	2,62	Заявленное значение
Коэффициент водопоглощения		%	0,5	$\leq 2,5 Ab_A$ $\leq 5,0 Ab_B$
Модуль тонкости (MT)	NF EN 12620 + A1 (2008)	–	1,97	$1,5 \leq FM \leq 4$
Содержание мелких частиц	NF EN 933-1 (2012)	%	1,0	$\leq 10 f_A$ $\leq 16 f_B$
Песчаный эквивалент (ПЭ)	NF EN 933-8 (2015)	%	77	$\geq 65 P_A$ $\geq 60 P_B$
Коэффициент рыхлости (КРы)	NF P 18-576 (2013)	%	18	–
Значение метиленового синего (МС)	NF EN 933-9 + A1 (2022)	g/kg	1,0	$\leq 1,5 (P_A \text{ et } P_B)$
Запрещенные примеси	XP P 18-546 (2020)		<0,01	$\leq 0,1$
Водорастворимые хлориды	NF EN 1744-1 + A1 (2014)	%	0,004	заявление
Общая сера	NF EN 1744-1 + A1 (2014)	%	0,12	$\leq 1 (S_A \text{ et } S_B)$
Кислоторастворимые сульфаты	NF EN 1744-1 + A1 (2014)	%	0,04	$\leq 0,2 (S_A \text{ et } S_B)$
Гуминовые вещества	NF EN 1744-1 + A1 (2014)	–	отсутствуют	отсутствуют
Растворимые активные щелочи	XP P 18-544 (2015)	%Na ₂ O _{eq}	0,0300	заявленное значение
Щелочная реакция	FD P 18-542 (2023)	–	NR	заявление

Таблица 3. Результаты анализа гранулометрического состава дробленого заполнителя 15/25

Сито (мм)	31,5 (1,4*D)	25	22,4 (D)	20	16	14 (d)	12,5	6,3 (d/2)	0,063	
Единица измерения – Метод	Кумулятивный пропуск (%) – NF EN 933-1 (2012)									
Обнаруженные значения	100	99	94	84	39	11	4	2	0,8	
Предельные значения	макс	10	–	99	–	–	20	–	5	1,5
	мин	98	–	90	–	–	0	–	0	0

Таблица 4. Результаты испытаний дробленого заполнителя 15/25

Параметр	Метод	Единица	Среднее значение	Спецификация
Реальная плотность	NF EN 1097-6 (2022) и 9 (2014)	мг/м ³	2,76	Заявленное значение
Коэффициент водопоглощения		%	0,4	$\leq 2,5 AbA$ $\leq 5,0 AbB$
Индекс хлопкообразности (ИХ)	NF EN 933-3 (2012)	%	11	$\leq 20 FIA$ $\leq 35 FIB$
Щелочная реакция	FD P 18-542 (2023)	%	NR	Заявление

Таблица 5. Результаты анализа распределения частиц по размеру дробленого заполнителя 15/25

Сито (мм)	20 (1,4*D)	16	14 (D)	11,2	10 (D/1,4)	8	5,6 (d)	4	3,15 (d/2)	0,063	
Единица измерения – Метод	Кумулятивный пропуск (%) – NF EN 933-1 (2012)										
Найденные значения	100	100	93	69	54	30	8	3	3	1,2	
Предельные значения	макс	10	–	99	–	70	–	20	–	5	1,5
	мин	98	–	80	–	25	–	0	–	0	0

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Таблица 6. Результаты испытаний дробленого заполнителя 5/15

Параметр	Метод	Единица	Среднее значение	Спецификация
Реальная плотность	NF EN 1097-6 (2022) et 9 (2014)	мг/м ³	2,77	Заявленное значение
Коэффициент водопоглощения		%	0,4	≤ 2,5 AbA ≤ 5,0 AbB
Индекс хлопкообразности (ИХ)	NF EN 933-3 (2012)	%	14	≤ 20 LIA ≤ 35 FIB
Устойчивость к фрагментации	NF EN 1097-2 (2020) et 5 (2008)	%	27	≤ 20 LAA ≤ 40 LAB
Коэффициент микродевалации	NF EN 1097-1 (2023)	%	16	Заявленное значение
Общее содержание серы	NF EN 1744-1 + A1 – 11.1 (2014)	%	0,08	≤ 1
Водорастворимые сульфаты	NF EN 1744-1 + A1 – 12 (2014)	%	0,03	≤ 0,2

Таблица 7. Результаты анализа распределения частиц дробленого заполнителя 0/5

Сито (мм)	12,5	11,2 (2D)	7,1 (1,4D)	5,6 (D)	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Единица измерения – Метод	Кумулятивный пропуск (%) – NF EN 933-1 (2012)										
Найденные значения	100	100	100	100	85	57	40	30	24	16	9,4
Предельные значения	макс	100	100	100	100	90	–	60	–	–	11
	мин	100	100	95	90	50	–	20	–	–	1

Таблица 8. Сводка результатов испытаний на 0/5 дробленном заполнителе

Параметр	Метод	Единица	Среднее значение	Спецификация
Реальная плотность	NF EN 1097-6 (2022) и 9 (2014)	мг/м ³	2,76	Заявленное значение
Коэффициент водопоглощения		%	0,4	≤ 2,5 AbA ≤ 5,0 AbB
Содержание мелких частиц	NF EN 933-1 (2012)	%	9,4	≤ 11
Значение метиленового	NF EN 933-9 + A1 (2022)	г/кг	0,2	≤ 1,5 (PA и PB)
Водорастворимый хлорид	NF EN 1744-1+A1(2014)	%	< 0,002	Декларировать
Гуминовые вещества	NF EN 1744-1+A1 – 15.1 (2014)	–	Отсутствует	Отсутствует
Водорастворимые активные щелочи	XP P 18-544 (2015)	%Na ₂ O _{eq}	0,0174	Заявленное значение
Щелочная реакция	FD P 18-542 (2023)	–	NR	Заявленное значение

смесей с гранулометрическим составом 0/5,6, соответствующим классу размера частиц: базовая серия + серия 1 (фракция размера 0/5 не признается в стандарте NF EN 12620 (2008)).

Цемент (см. табл. 9)

Джутовые волокна

В цементном растворе используются короткие джутовые волокна длиной не более 5 мм. Они были

получены в ходе процесса подготовки и обработки, описанного в работе [17]. Эта процедура, которая уже прошла экспериментальную проверку, обеспечила хорошее распределение волокон в цементной матрице, что позволило получить однородную смесь, как показано в указанном исследовании.

Уровень защиты

В рамках нашего исследования структурная категория соответствует категории II. Класс воздей-

Таблица 9. Химические и физические характеристики цемента ЦЕМ III 42.5

Показатель	Единица измерения	Результат
Химические свойства гидравлических вяжущих		
Кремниевые компоненты (P)	%	0,00
Кальциевые компоненты (C)	%	0,00
Регулятор схватывания (R)	%	3,70
Содержание клинкера (K)	%	30,80
Содержание шлака (L)	%	65,51
Al ₂ O ₃ (XRF)	% m/m	10,38
CaO (XRF)	% m/m	48,04
Fe ₂ O ₃ (XRF)	% m/m	1,31
K ₂ O (XRF)	% m/m	0,35
MgO (XRF)	% m/m	5,17
Mn ₂ O ₃ (XRF)	% m/m	0,18
Na ₂ O (XRF)	% m/m	0,29
SiO ₂ (XRF)	% m/m	28,26
TiO ₂ (XRF)	% m/m	0,54
Эквивалент Na ₂ O (XRF)	% m/m	0,52
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (XRF)	% m/m	39,95
MnO (XRF)	% m/m	0,16
Потеря при прокаливании при 950 °С	% m/m	2,45
Механические свойства гидравлических вяжущих		
Средняя прочность на сжатие (2 дня)	МПа	14,2
Средняя прочность на сжатие (7 дней)	МПа	35,1
Средняя прочность на сжатие (28 дней)	МПа	49,8
Физические свойства гидравлических вяжущих		
Надежность	мм	0
Содержание воды для стандартной консистенции	%	35,0
Удельная поверхность (Блейн)	см ² /г	5350
Удельная поверхность (Блейн)	м ² /кг	535
Время начального схватывания	мин	250
Средняя плотность	г/см ³	2,80

Таблица 10. Химическая характеристика джутовых волокон [17]

Показатель	Альфа-целлюлоза (%)	Гемицеллюлоза (%)	Лигнин (%)	Зола (%)	Плотность (г/см ³)	pH
Среднее значение	45,50	23,0	3,9	0,58	1,46	5,63

ствия – ХНЗ, поскольку бетонная конструкция регулярно подвергается воздействию брызг воды.

Согласно приведенной выше матрице, соответствующий класс воздействия – Cs.

Меры предосторожности, связанные с уровнем защиты

Для обеспечения данного уровня предотвращения необходимо учитывать риск возникновения проблем,

связанных с отсроченным образованием этрингита (DEF), посредством одной из следующих двух мер предосторожности, обозначенных как 1 и 2:

1. Максимальная температура внутри бетона должна оставаться ниже 70 °С.

2. Если максимальная температура, достигаемая внутри бетона, не может быть удержана ниже 70 °С, она должна оставаться ниже 80 °С и должно быть выполнено по крайней мере одно из следующих шести условий:

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

- Термическая обработка должна контролироваться надлежащим образом (Примечание 1); продолжительность периода, в течение которого температура бетона превышает 70 °С, не должна превышать 4 часа, а содержание активного эквивалента щелочи в бетоне должно быть менее 3 кг/м³;
- Использование цемента, соответствующего стандарту NF P 15-319 (ES), или сульфатостойкого (SR) цемента в соответствии со стандартом NF EN 197-1 (за исключением цементов CEM I SR3 и SR5) для бетонов, подвергающихся воздействию температур выше 70 °С в течение периодов, превышающих 10 часов. Цементы CEM I SR3 и SR5 допускаются к применению, если продолжительность воздействия температур выше 70 °С составляет менее 10 часов, при условии, что содержание активных эквивалентных щелочей в бетоне не превышает 3 кг/м³;
- Использование цемента CEM I SR3 или SR5, имеющего сертификационный знак NF «Гидравлические вяжущие» и квалифицированного в соответствии с методологией, указанной в Приложении 5, в случаях, когда продолжительность пребывания при температуре выше 70 °С превышает 10 часов;
- Использование цементов, не соответствующих стандарту NF P 15-319 (ES), типов CEM II/B-V, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V) с содержанием золы-уноса более 20%, CEM III/A или CEM V, при условии, что все эти цементы имеют содержание SO₃ не более 3% и изготовлены из клинкера с содержанием C₃A не более 8%;
- Использование в сочетании с цементом CEM I или CEM II/A золы-уноса, соответствующей стандарту NF EN 450-1, молотого гранулированного доменного шлака, соответствующего стандарту NF EN 15167-1, микрокремнезема, соответствующего стандарту NF EN 13263-1, или метакаолина, соответствующего стандарту NF P 18-513.

Их доля в вяжущем (цемент + добавки) должна составлять не менее 20% для золы-уноса, 35% для молотого гранулированного доменного шлака, 10% для микрокремнезема (Примечание 2) и 20% для метакаолина. Используемое вяжущее должно соответствовать следующим требованиям: C₃A (относительно клинкера) < 8% и SO₃ (относительно вяжущего) < 3%;

- Проверка долговечности бетона в отношении позднего образования этрингита (DEF) посредством испытания эксплуатационных характеристик и соответствия критериям принятия решения.

В связи с использованием цемента SR в соответствии с NF EN 197-1 максимально допустимая температура во время схватывания бетона составляет 80 °С.

Исследуемая рецептура смеси

Для оценки риска позднего образования этрингита (DEF) будет использована рецептура смеси, обеспечивающая максимальный рост температуры и характеризующаяся высоким содержанием цемента.

Состав исследуемой смеси, обозначенной как «BPS XA2-XA3 C35/45 C1 0,65 210 ± 30 мм», далее именуемой «экспериментальный бетон», представлен в таблице 11.

Оценка повышения температуры

Расчет, выполненный в соответствии с положениями руководства DEF, представлен в таблице 12.

Максимальная температура бетона во время укладки должна быть ниже 60,2 °С, чтобы предотвратить риск внутренней сульфатной реакции. Поскольку максимально допустимая температура бето-

Таблица 11. Составляющие компоненты рецептуры напыляемого бетона

Состав экспериментального бетона	Дозировка (кг/м ³)	Спецификация (кг/м ³)
ЦЕМ III/B 42,5 N – NОCIBЕ	420	≥380
Песок из лагуны 0/4	633	–
Щебень 0/5	293	–
Дробленый заполнитель 5/15	480	–
Дробленый заполнитель 15/25	339	–
Sika ViscoFlow 800 Power	3,36 (0,80 % от С)	–
Sika ViscoFlow 200 Timer	1,47 (0,35% от С)	–
Sika SikaTard 300 SLS	1,26 (0,30% от С)	–
Эффективная вода	180,0	–
Теоретическая плотность	2317	–

Таблица 12. Расчет, выполненный в соответствии с рекомендациями IFSTTAR

Составная часть	Экспериментальный бетон
Толщина бетона	1,02 м
Максимальная температура для уровня Cs	80 °С
Плотность бетона (кг/м ³)	2317
Содержание цемента ЦЕМ III/42.5N – NОCIBЕ	420
Прочность цемента на сжатие через 2 дня (МПа)	13
Прочность цемента на сжатие через 28 дней (МПа)	47
Цемент Q41h (Дж/г)	178
Цемент Q120h (Дж/г)	194
Qm/Q41	1,39
Эффективная вода (кг)	180
Эффективная вода / Эквивалентное вяжущее	0,43
Влияние E/C-α	0,98
Адиабатический рост температуры ΔT (без рассеивания тепла)	39,5 °С
Тепловые потери R	0,492
Повышение температуры с рассеиванием тепла ΔT	19,4 °С
Максимальная начальная температура бетона	60,2 °С

Таблица 13. Механические и физические свойства свежесушеного и затвердевшего бетона

Параметр	Спецификация	Результаты испытаний свежего бетона		
		ВР 1	ВР 2	ВР 3
Размер кубических образцов		1×1×1 м	1,6×1,6×1,6 м	1,6×1,6×1,6 м
Плотность свежего бетона (кг/м ³)		2418	2381	
Включения воздуха (%)		1,0	1,3	1,1
Кровотечение (мл/мин)		0	0	0
Температура окружающей среды (°С)		32,0	32,5	32,0
Температура бетона (°С)	≤ 35	34,2	33,6	38
Осадка (мм)	210±30	220	223	230
Перевернутый конус (с)	≤ 4	2,8	2,8	2,0
Следы удара (мм)	600±50	600	600	620
		Результаты испытаний на затвердевшем бетоне		
Прочность на сжатие МПа	7 дней	41,5	45,9	35
	28 дней	≥ 49	51,9	42,6
Прочность на разрыв, МПа	28 дней	≥ 2,7	2,9	2,34

на во время укладки составляет 35 °С, это требование будет выполнено.

Тепловые испытания

Были изготовлены кубические образцы объемом 1 м³, изолированные 10-сантиметровым слоем полистирола со всех шести сторон, и два кубических образца со стороной 1,6 м. На образцах были установлены три термодатчики (по одной в верхней,

центральной и нижней частях). Четвертая термодатчика использовалась для регистрации температуры окружающей среды вблизи элемента. Наблюдения за образцами кубов велись в течение семи дней подряд.

• Тепловое испытание кубического образца размером 1 × 1 × 1 м (ВР1)

Кривые, зарегистрированные тремя датчиками, встроенными в бетон, схожи, и максимальная температура сохраняется в течение нескольких часов.

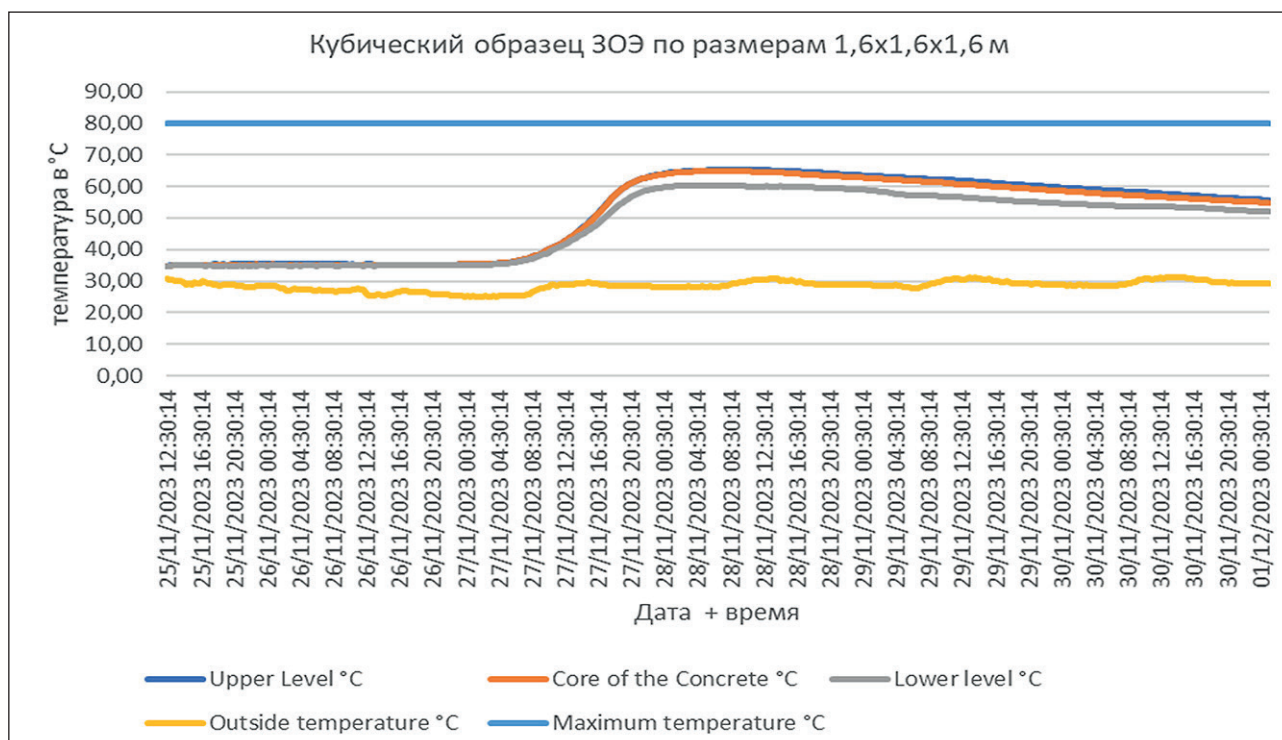


Рис. 4. Динамика изменения температуры в кубическом образце ВР1

Максимальный рост температуры, зафиксированный в ходе испытания, составил 31,2 °С (65,2–34,0). Учитывая, что максимальная температура бетона при укладке составляла 34,2 °С, максимальная температура, которая могла быть достигнута в процессе схватывания, составляет 66,2 °С. Поскольку эта температура ниже порога 80 °С, связанного с уровнем

предотвращения Cs, бетон считается соответствующим требованиям.

• **Термическое испытание кубического образца размером 1,6 × 1,6 × 1,6 м (ВР2)**

Кривые, зарегистрированные тремя датчиками, встроенными в бетон, схожи, и максимальная температура сохраняется в течение нескольких часов.

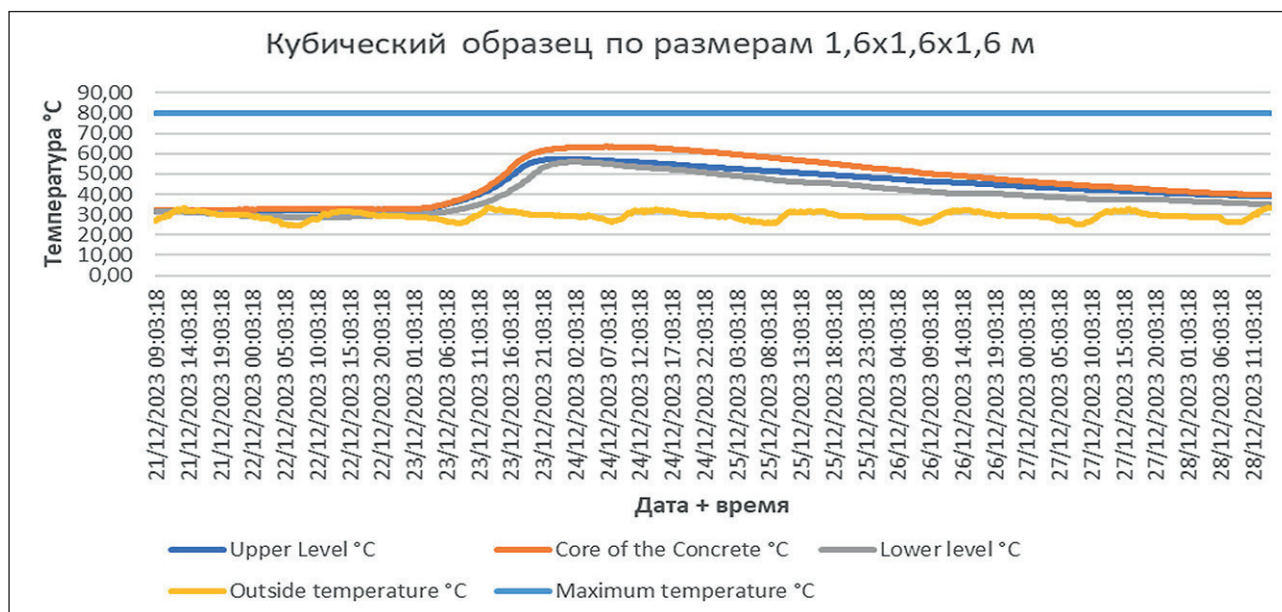


Рис. 5. Динамика изменения температуры в кубическом образце ВР2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Максимальный рост температуры, зафиксированный в ходе испытания, составил 31,4 °С (63,4–32,0). Учитывая, что максимальная температура бетона при укладке составляла 35 °С, максимальная температура, которая могла быть достигнута в процессе схватывания, составляет 66,4 °С. Поскольку эта температура ниже порогового значения 80 °С, связанного с уровнем предотвращения Cs, бетон соответствует требованиям.

• Термические испытания образца размером 1,6×1,6×1,6 м (ВРЗ)

Согласно рисунку 6, наблюдается нестабильная динамика температуры, связанная с высокой температурой свежего бетона. Эта нестабильность особенно заметна на кривой температуры нижней части бетона, где после достижения бетоном пиковой температуры, соответствующей максимальному зарегистрированному значению, отчетливо просле-

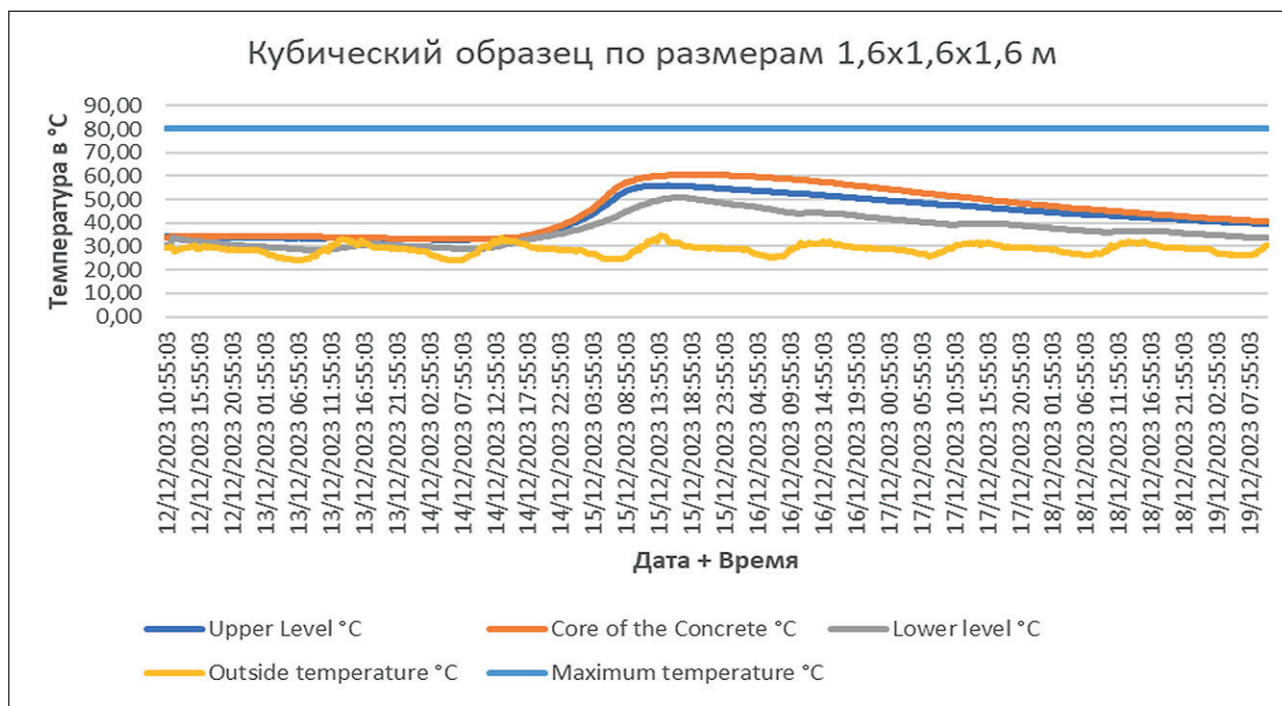


Рис. 6. Динамика температуры в кубическом образце ВРЗ



Рис. 7. Слева: кубический образец DEF размером 1×1×1 м³, справа – кубический образец DEF размером 1,6×1,6×1,6 м³

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

живаются последовательные фазы повышения и понижения температуры.

Нанесение раствора на бетон

Чтобы проверить, окажет ли упругий бетон какое-либо воздействие на раствор, раствор нанесли на бетон с целью наблюдения за влиянием бетона на него. По истечении 90 дней в растворе не было




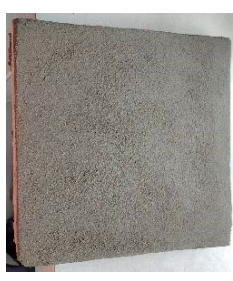



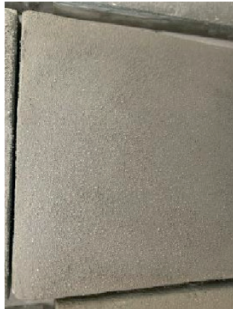


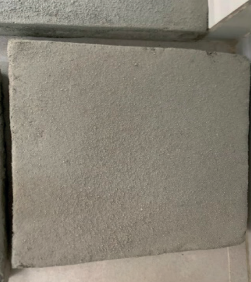



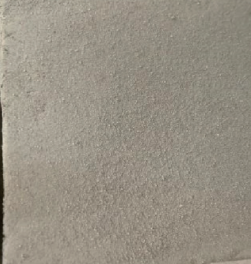

обнаружено ни трещин, ни каких-либо резких изменений.

После нанесения раствора на соответствующий бетон в течение 90 дней трещин не наблюдалось.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как и в случае с составами образцов ВР1 и ВР2, температура свежего бетона оставалась ниже 35 °С,

Таблица 14. Сводная информация по нанесению раствора на бетоне

Дни	Эталонный раствор	Раствор + 0,5% джутовых волокон	Раствор + 1,0% джутовых волокон	Раствор + 1,5% джутовых волокон
0 дней				
7 дней				
28 дней				
90 дней				

что считается благоприятным условием для правильного протекания гидратационных реакций и оптимального развития механических свойств. В ходе испытания кубиков на позднее образование этtringита (DEF) тепловой режим демонстрировал нормальное поведение, характеризующееся постепенным повышением температуры с последующей фазой охлаждения, при этом максимальная температура не превышала 80 °С. Такой контроль теплового режима обеспечил механические характеристики, соответствующие нормативным требованиям как при сжатии, так и при растяжении. Результаты ясно показывают, что контроль температуры свежего бетона важен, контроль температуры нужен, чтобы получить хорошие механические свойства после затвердевания. Без контроля температуры механические свойства получаются хуже. Реакции гидратации сами по себе выделяют тепло, а большие конструкции быстрее нагреваются и медленнее остывают [18–22]. Наблюдения, сделанные в этом исследовании, полностью согласуются с выводами авторов.

Для образца ВРЗ температура свежего бетона поднялась выше 35 °С, и это сразу же отразилось на поведении материала. При испытании внутренней сульфатной реакции (ВСР) температура вела себя нестабильно – то поднималась, то падала несколько раз подряд, хотя ее максимум все равно не превышал 80 °С. Температура же была нестабильной, и из-за этой термической нестабильности механические характеристики стали плохими. И при сжатии, и при растяжении материал показал слабость, да еще хуже. Этот случай ясно показывает: чем выше температура свежего бетона, тем хуже механические характеристики, даже если максимум температуры остается в допустимых пределах.

Когда нанесли раствор на бетон, было проверено – трещин нет. Вот это сразу показывает, что целый бетон держит раствор ровно. Если в бетоне нет деформаций от позднего образования этtringита (DEF), то раствор сохраняет свои размеры и выглядит нормально, без признаков разрушения. Такие

результаты совпадают с тем, что указано в литературных источниках: наличие ISR в бетоне постепенно снижает его механические свойства. Эта проблема проявляется в том, что прочность на сжатие падает, а способность выдерживать растягивающие нагрузки тоже падает. По-видимому, проблема связана с тем, что образование этtringита задерживается, а задержка происходит из-за плохих тепловых условий. Плохие тепловые условия повышают риск растрескивания и длительного разрушения бетона. [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе этой работе мы обнаружили в этом исследовании следующее:

Мы считали, что лабораторный контроль нужен уже на этапе разработки рецептуры и при наблюдении за бетоном. Мы также проверяли появление позднего этtringита (DEF). Мы видели, что если температура свежего бетона выше 35 °С, то может возникнуть неустойчивость, даже когда температура куба остается ниже 80 °С. Эта неустойчивость сильно ухудшает прочность бетона, особенно при сжатии и растяжении. Как видим, без контроля температуры трудно получить хорошие результаты.

Мы наносили раствор на поверхность, чтобы проверить бетон под ним. Если бетон в порядке, раствор остается ровным и без трещин даже через 90 дней. Если же бетон имеет скрытые дефекты, например ISR, то на поверхности появятся видимые дефекты в растворе.

Контроль температуры свежего бетона важен с самого начала замешивания. Температуру надо держать в нужных пределах, иначе может появиться этtringит (DEF). С нашей точки зрения, такие параметры нельзя игнорировать ни в лаборатории, ни на стройке, потому что от температуры бетона и от наличия этtringита зависит, как долго прослужит бетон. Зависит и от того, как хорошо будет держаться слой раствора. Если бетон испортится, то раствор тоже испортится. И тогда вся конструкция окажется под угрозой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adrien Socié, Frédéric Dubois, Yann Monerie, Mejdj Neji, Frédéric Péralès. Simulation of internal and external sulfate attacks of concrete with a generic reactive transport-poromechanical model. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2023. – Vol. 27, No. 12. – Pp. 3679–3706. – <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2146317>. – EDN SHMTKI.
2. Martin RP. Analysis of the mechanical effects of internal sulfate reaction in concrete using model structures PhD Thesis Paris: École des Ponts ParisTech; 2011. 341 p. <https://pastel.hal.science/tel-00558200v2>
3. Kchakech B. Study of the influence of thermal exposure on the risk of expansions associated with internal sulfate reaction in concrete. PhD Thesis; 2016. <https://theses.hal.science/tel-01234288v2>

4. Heinz D, Ludwig U. Mechanism of secondary ettringite formation in mortars and concretes subjected to heat treatment. In: Scanlon JM, editor. *Concrete Durability (ACI SP-100)*. Detroit: American Concrete Institute; 1987. p. 2059–2071. Available from: <https://trid.trb.org/View/281645>
5. Tepponen P, Eriksson BE. Damages in concrete railway sleepers in Finland. *Nordic Concrete Research*. 1987;6:199–209.
6. Shayan A, Quick GW. Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers. *ACI Materials Journal*. 1992;89(4):348–361.
7. Mielenz RC, Marusin SL, Hime WG, Jugovic ZT. Investigation of prestressed concrete railway tie distress. *Concrete International*. 1995;17(12):62–68.
8. Thaulow N, Rostam S. Field cases of delayed ettringite formation. In: *International RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*. Villars, Switzerland; 2002. P. 85–97.
9. Santos Silva A, Pimentel A, Marques P. Diagnosis and prognosis of Portuguese concrete railway sleepers degradation – a combination of ASR and DEF. In: *13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*. Trondheim, Norway; 2008.
10. Divet L. Is there a risk of endogenous sulfate activity developing in large-mass concrete elements? The case of the Ondes Bridge (Haute-Garonne). *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. 1998;213:59–72.
11. Divet L. Internal sulfate reactions in concrete: contribution to the study of the mechanisms of delayed ettringite formation. Paris: Central Laboratory of Roads and Bridges (LCPC); 2001. 227 p.
12. Aubagnac C, Wendling JC. Presentation of the Gevry Bridge over the Doubs – RD 905. In: *Internal Sulfate Reaction in Concrete: Risk Prevention and Management of Affected Structures*. Paris: LCPC Technical Day; 2007.
13. D. Kretz , &T. G. B., Recommendations for the prevention of disorders caused by internal sulfate reaction., *Technical Guide of the Roads and Bridges Laboratories*. Paris: Central Laboratory for Roads and Bridges (LCPC); 2007. 59 p.
14. Pavoine A, Brunetaud X. Development and validation of a test method for delayed ettringite formation: application to the study of the impact of different parameters on the kinetics and magnitude of expansion. Paris: (LCPC); 2010. 224 p., http://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/ERLPC/ERLPC-OA-LCPC-OA65.pdf
15. Bissonnette B, Pasquier M. Comparison of the durability of structural concretes made with different cements subjected to internal sulfate attack. In: *Proceedings of the AUGC Conference*; 2012.
16. IFSTTAR. Recommendations for the prevention of disorders caused by internal sulfate reaction. Paris: French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks (IFSTTAR); 2017.
17. Zomahoun C.V., Houanou K.A., Sodomon M., Samchenko S.V., & Dossou S.K. (2025). Ecological Reinforcement of Cementitious Mortars with Jute Fibres: Effects on Mechanical Performance. *BioResources*, 20(3), 7514–7524. <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.7514-7524>. – EDN: EICANL.
18. Bernard B. Chemomechanical coupled modeling of concrete affected by internal sulfate reaction. PhD Thesis. Paris: National School of Bridges and Roads; 2008.
19. Boenig A, Fúnez LM, Memberg L, Roche J, Tinkey B, et al. Structural assessment of bridges with premature concrete deterioration due to expansive reactions. *ACI Structural Journal*. 2009;106(2):196–204
20. Divet L, Pavoine A. Delayed ettringite formation in massive concrete structures: an account of some studies of degraded bridges. In: *International RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*. Villars (Switzerland); 2002. P. 9–126.
21. Houndonougbo T. Efficiency and durability of polymer coatings for the protection of concrete structures affected by internal sulfate reaction (ISR): from specimen to structure. PhD Thesis; 2024. Available from: <https://theses.hal.science/tel-04621811>
22. Pavoine N. Combined effects of different factors on concrete expansion caused by delayed ettringite formation (DEF). PhD Thesis. Sherbrooke: University of Sherbrooke; 2003.
23. Shamaa MA. Study of the risk of development of an internal sulfate reaction and its consequences in structural concrete of nuclear facilities. PhD Thesis; 2013. <https://theses.hal.science/tel-00787974>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зомахун Комлан Вианней – аспирант, Университет Абомей-Калави, Политехническая школа Абомей-Калави, Лаборатория энергетики и прикладной механики, Абомей-Калави, Республика Бенин, vianneyzomahoun@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-3285-1807>

Хоуану Кокуви Агапи – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Гражданского Строительства», Университет Абомей-Калави, Политехническая школа Абомей-Калави, Лаборатория энергетики и прикладной механики, Абомей-Калави, Республика Бенин, agapi.houanou@uac.bj, <https://orcid.org/0009-0008-4722-3291>

Содомон Марк – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения Института промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Российская Федерация, sodomonmarc@yahoo.fr, <https://orcid.org/0000-0003-4101-6538>

Самченко Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительного материаловедения Института промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, samchenko@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3523-593X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Зомахун Комлан Вианней – литературный обзор; проведение экспериментальной работы; сбор и систематизация экспериментальных данных обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов машинного обучения; графическое и табличное представление результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Хоуану Кокуви Агапи – научное руководство; разработка концепции и развитие методологии исследования; анализ результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Содомон Марк – обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов машинного обучения; графическое и табличное представление результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов; перевод текста статьи на русский язык.

Самченко Светлана Васильевна – методологическая поддержка исследования, участие в формулировке; критическое рецензирование; редактирование и доработка рукописи; проверка достоверности результатов исследования и выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.05.2026; одобрена после рецензирования 09.06.2026; принята к публикации 13.06.2026.